

УДК 656.222.4:385

А. П. КЕЙЗЕР, кандидат технических наук, И. А. КЕЙЗЕР, магистр экономических наук, К. М. ШКУРИН, магистр технических наук, А. Г. ГИНЬКО, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПЕЗДОВ

График движения поездов в современных условиях рассматривается с позиции оценки таких показателей, как участковая скорость, расход топлива, эксплуатационные расходы. Приводятся результаты вычисления зависимости расхода топлива и эксплуатационных расходов от скорости движения для различных значений массы поезда. Разработана блок-схема алгоритма и программное обеспечение. Для получения зависимости расхода топлива от ходовой скорости используется математический метод – принцип максимума Понтрягина с одной функцией. Для получения зависимости эксплуатационных расходов от скорости движения используется метод расходных ставок.

График движения поездов (ГДП) и его реализация в современных условиях. Основной задачей транспорта является полное и своевременное удовлетворение потребностей экономики в перевозках. Перед железнодорожным транспортом постоянно стоит проблема более оптимального использования пропускной и провозной способностей направлений и участков, увеличения массы и скорости движения поездов, рационального потребления топливно-энергетических ресурсов.

Свое конкретное выражение проблемы массы Q , скорости v (ходовой v_x , технической v_t , участковой v_y), потребления ресурсов (расход топлива G , электроэнергии \mathcal{E}) находят в графике движения поездов, который объединяет в единое целое работу диспетчеров, машинистов, работников станций, депо, путевого хозяйства, сигнализации, связи и других подразделений транспортного комплекса, связанных с движением поездов.

Процессу разработки ГДП уделяется много внимания. Ему предшествует работа по подготовке и обработке большого количества данных. На многих дорогах ведутся централизованные расчёты по составлению графиков с помощью прикладных программ.

Реальная эксплуатационная обстановка на железнодорожных участках часто существенно отличается от нормативных условий планового ГДП. Возникающие при этом трудности нередко усугубляются неоптимально принятыми решениями как со стороны дежурных по станциям и диспетчерского аппарата, так и со стороны машинистов локомотивов, что часто ведет к невыполнению ГДП.

Поэтому для повышения эффективности управления движением поездов необходима принципиально новая технология управления, базирующаяся на научно обоснованном взаимодействии оперативного плана формирования и ГДП с реальным перевозочным процессом и экономической оценкой результатов.

Для оценки ГДП важно не только чувствовать качественные показатели выполнения графика движения поездов (v_x , v_t , v_y), но и его экономическую результативность в виде эксплуатационных расходов ΣE , основную часть которых составляют расходы на топливо.

Основное транспортное противоречие при выполнении графика движения поездов. Один из существенных резервов повышения эксплуатационной надежности [1, 5] и точности выполнения ГДП заложен в противоречивом характере учета основных показателей работы транспорта (v_x , v_t , v_y , G). Стремление увеличить скорость движения поездов, в чем заинтересован

поездной диспетчер, приводит к перерасходу (пережогу) топлива и электроэнергии, в чем не заинтересован машинист.

Машинист ведет поезд по конкретному участку из начального состояния в конечное, стараясь экономить топливо или электроэнергию. Инженер-теплотехник локомотивного депо по результатам каждой поездки машиниста рассчитывает экономию или пережог топлива. Но является ли этот результат истинной экономией или пережогом? Решение данного вопроса связано с технико-экономическим сравнением.

Использование математического метода – принцип максимума Понтрягина с одной ψ -функцией ($\psi = \text{const}$) для расчёта зависимости изменения расхода топлива G и суммарных эксплуатационных расходов ΣE от ходовой скорости v_x для различных масс поезда Q . Диспетчерский участок Г-К разбивается на шаги варьирования ΔSB_j . Под шагом варьирования ΔSB_j следует понимать такой отрезок пути ΔS , на котором уклон профиля пути UB_j и режим движения NK не меняются. Исследования [4] показали, что при разбивке профиля пути на шаги варьирования ΔSB_j , UB_j следует опираться на заданный шаг варьирования ΔSB_3 , равный 500 или 1000 м. В разработанном программном обеспечении разбивка профиля пути на шаги варьирования осуществляется подпрограммой *PSAGB*.

При реализации принципа максимума Понтрягина с одной ψ -функцией условие оптимальности выглядит следующим образом [5, 6]:

$$H = -G_{\dot{v}} + \psi \xi F, \quad (1)$$

где H – критерий оптимальности; $G_{\dot{v}}$ – удельный (часовой) расход топлива; ψ – вспомогательная переменная, представленная вещественным десятичным числом;

$$\xi = \frac{g}{Q + P}; \quad (2)$$

Q – масса вагонов поезда (масса состава); P – масса локомотива; g – ускорение свободного падения с учетом вращающихся масс, скорректированное значение $g = 120 \text{ км/ч}^2$; F – равнодействующая сил, приложенных к поезду в процессе его движения,

$$F = F_k(NK, R_e, \vartheta) - W_v(\vartheta) - W_l(\vartheta) - W_{yк} - B_t, \quad (3)$$

F_k – сила тяги локомотива; NK – режим движения поезда ($NK = 0$ – режим холостого хода, $NK = 1, 2, \dots, NK_{\text{max}}$ –

позиции контроллера; для тепловоза 2ТЭ10М максимальная позиция контроллера $NK_{\max} = 15$); W_b – полная сила сопротивления вагонов; W_d – полная сила сопротивления локомотива; $W_{ук}$ – полная сила сопротивления от уклона профиля пути; B_T – тормозная сила (при расчёте зависимости $G = f(v_x, Q)$ значение $B_T = 0$); R_e – режим ослабления поля тяговых двигателей локомотива. $R_e = 0$ – режим полного поля; $R_e = 1$ – режим ОП1; $R_e = 2$ – режим ОП2.

В работе [5] доказано, что для некоторых задач при расчёте оптимальных режимов ведения при тепловозной тяге с помощью принципа максимума Понтрягина ($\psi = \text{const}$) параметром R_e можно пренебречь.

Задаемся значением ψ , значением начальной скорости v_0 в начале шага варьирования и по формуле (1) вычисляем значения:

$$\begin{aligned} H_0 &= -G_{\psi} + \psi \xi F \text{ при } NK = 0; \\ H_1 &= -G_{\psi} + \psi \xi F \text{ при } NK = 1; \\ H_2 &= -G_{\psi} + \psi \xi F \text{ при } NK = 2; \\ &\dots \\ H_k &= -G_{\psi} + \psi \xi F \text{ при } NK = NK_{\max}. \end{aligned}$$

Та позиция контроллера NK , при которой значение H максимально, считается оптимальной, $NK_{\text{опт}} = NK$.

Решая систему дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{d\vartheta}{ds} = \frac{1}{\vartheta} \xi F; \\ \frac{dt}{ds} = \frac{1}{v} \end{cases} \quad (4)$$

одним из численных методов: Эйлера; Эйлера-Коши с итерациями; Рунге-Кутта; линейной аппроксимации производной при $NK = NK_{\text{опт}}$, находим скорость v_1 в конце каждого шага варьирования ΔSB_j , а также время ΔTB_j и расход топлива ΔGB_j на этом шаге варьирования. В программном обеспечении запрограммированы все четыре метода, однако самым эффективным по быстродействию оказался метод линейной аппроксимации производной, разработанный и апробированный в БелИИЖТе-БелГУТе А. М. Костроминым [6] и А. П. Кейзером [5].

После расчёта скорости v_1 переходим к следующему шагу варьирования $\Delta SB = \Delta SB_{j+1}$. Конечная скорость v_1 шага ΔSB_j становится начальной скоростью v_0 шага ΔSB_{j+1} . Вычисляя значения H_0 ($NK = 0$), H_1 ($NK = 1$), ... H_k ($NK = NK_{\max}$), определяем оптимальную позицию контроллера $NK_{\text{опт}}$ шага ΔSB_{j+1} . По аналогии находим значения v_{1j+1} , ΔTB_{j+1} , ΔGB_{j+1} .

Суммируя значения $\Sigma \Delta TB_j$ и $\Sigma \Delta GB_j$, получаем расчётное время движения поезда по заданному участку TR и расход топлива GR . Если расчётное время TR не совпало с заданным $T_{\text{зад}}$, корректируем значение ψ и повторяем весь расчёт по шагам варьирования ΔSB_j до тех пор, пока $|TR - T_{\text{зад}}| < \varepsilon$. Для подбора значения ψ используются численные методы решения уравнения с одним неизвестным (неизвестным является значение ψ): метод половинного деления, метод хорд, касательных, итераций и др.

Предложим новую, более оригинальную методику автоматизированного расчета всех точек на графике $G = f(v_x)$ при заданном значении массы поезда Q .

Задаемся значением v_n начальной скорости движения поезда на участке в диапазоне от v_{\min} до v_{\max} , где v_{\min} и v_{\max} – минимально и максимально допустимая скорость движения поезда на заданном участке. Можно задать среднее значение $v_n = (v_{\min} + v_{\max})/2$. В разработанном программном обеспечении необходимо ввести три значения: начальное значение $\psi = \psi_{\text{нач}}$, конечное значение $\psi = \psi_{\text{кон}}$ и шаг изменения значений ψ ($\Delta\psi$). Количество точек на графике $G = f(v_x)$ при заданном Q будет

$$n = \frac{\psi_{\text{кон}} - \psi_{\text{нач}}}{\Delta\psi} + 1. \quad (5)$$

Для определения значений $\psi_{\text{нач}}$ и $\psi_{\text{кон}}$ можно использовать закономерность $\psi = f(Q)$, найденную в [5].

Для получения одной точки на графике $G = f(v_x)$ при заданном значении ψ можно использовать 6–8 итераций. Для 1-й итерации $v_n = (v_{\min} + v_{\max})/2$; для 2-й и последующих итераций $v_n = v_k$ (где v_k – конечная скорость поезда на расчётном участке; L – номер итерации). Результаты расчёта (фрагмент всего расчёта) представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчет кривых скорости, времени и расхода топлива для построения зависимости $G = f(v, Q)$; масса поезда – $Q = 3580$ т

№ итерации	Величина шага варьирования ΔS , м	Уклон профиля пути U	Оптимальная позиция контроллера NK	Скорость в начале шага варьирования v_{0B}	Скорость в конце шага варьирования v_{1B}	Время на шаге варьирования ΔT , с
Значение $\psi = 1,25$						
1	820	0,0	13	50,00	52,67	57,50
	820	0,0	13	52,67	54,88	54,90
	600	1,1	0	54,88	50,88	40,85
	550	-2,7	13	50,88	55,76	37,13
	550	-2,7	0	55,76	56,67	35,22
	700	6,0	0	56,67	43,65	50,24
	850	-1,3	14	43,65	50,88	64,74
...						
8	820	0,0	13	51,74	54,10	55,78
	820	0,0	13	54,10	56,08	53,59
	600	1,1	0	56,08	52,13	39,92
	550	-2,7	13	52,13	56,80	36,35
	550	-2,7	0	56,80	57,67	34,59
	700	6,0	0	57,67	44,89	49,14
	850	-1,3	14	44,89	51,75	63,33
Значение $\psi = 1,5$						
1	820	0,0	14	51,75	54,60	55,51
	820	0,0	14	54,60	56,95	52,93
	600	1,1	13	56,95	56,79	37,98
	550	-2,7	13	56,79	60,77	33,68
	550	-2,7	13	60,77	64,24	31,68
	700	6,0	13	64,24	56,91	41,60
	850	-1,3	13	56,91	60,63	52,07
...						
Значение $\psi = 2,25$						
8	820	0,0	15	74,79	75,16	39,37
	820	0,0	15	75,16	75,50	39,19
	600	1,1	14	75,50	74,46	28,81
	550	-2,7	15	74,46	77,01	26,14
	550	-2,7	14	77,01	79,15	25,36
	700	6,0	14	79,15	72,47	33,24
	850	-1,3	15	72,47	74,78	41,56

Расчёт зависимости суммарных эксплуатационных расходов ΣE от ходовой скорости. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 1.

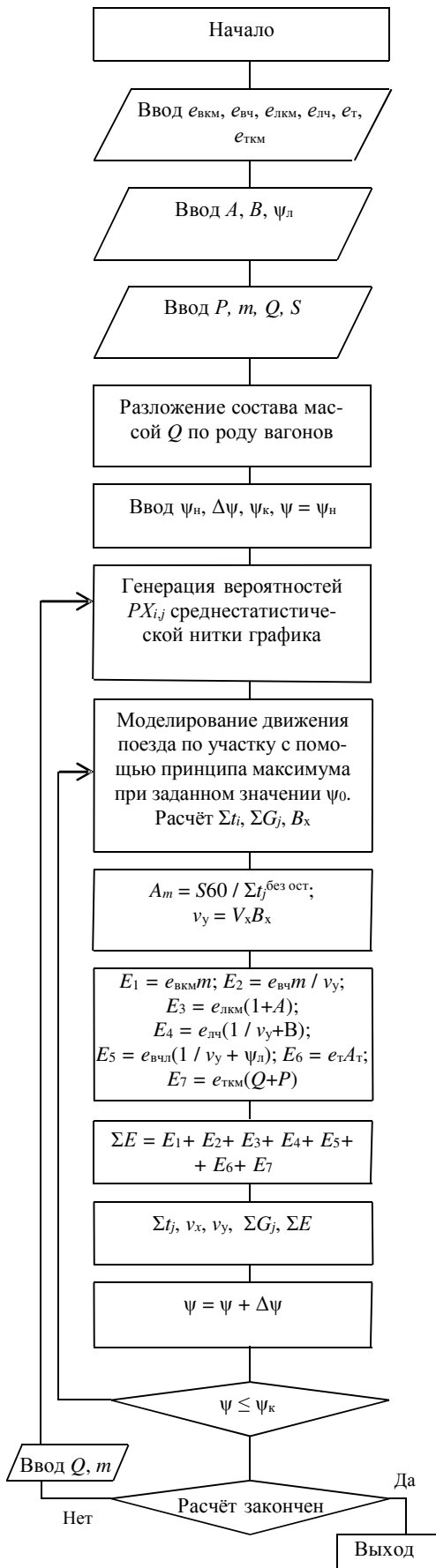


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма расчётов

Пояснения к алгоритму расчётов:

- $e_{вкм}$ – расходная ставка на 1 ваг·км, руб.;
- $e_{вч}$ – расходная ставка на 1 ваг·ч, руб.;
- $e_{лкм}$ – расходная ставка на 1 лок·км, руб.;
- $e_{лч}$ – расходная ставка на 1 лок·ч, руб.;
- $e_{вчл}$ – расходная ставка на 1 бриг·ч локомотивной бригады, руб.;
- $e_{т}$ – расходная ставка на топливо, руб.;
- $e_{ткм}$ – расходная ставка на 1 т·км брутто вагонов и локомотивов, руб.;
- S – длина участка, км;
- $\psi_{л}$ – вспомогательное время работы локомотивных бригад, отнесенное на 1 км линейного пробега, ч;
- P – масса локомотива, т;
- m – количество вагонов в составе поезда, шт.;
- Q – масса поезда, т;
- A – условный пробег локомотива в рабочем состоянии, приходящийся на 1 лок·км;
- B – простой локомотивов в основном депо и пунктах оборота, приходящийся на 1 лок·км, ч;
- T_x – чистое время хода грузового поезда по участку, определяемое тяговыми оптимизационными расчетами с помощью принципа максимума Понтрягина, мин;
- G_t – расход топлива на участке за время T_x , кг.

Результаты расчета зависимости изменения расхода топлива G (кг) и суммарных эксплуатационных расходов ΣE , руб., приходящихся на 1 поезд·км, от ходовой скорости движения v_x , км/ч, представлены на рисунке 2.

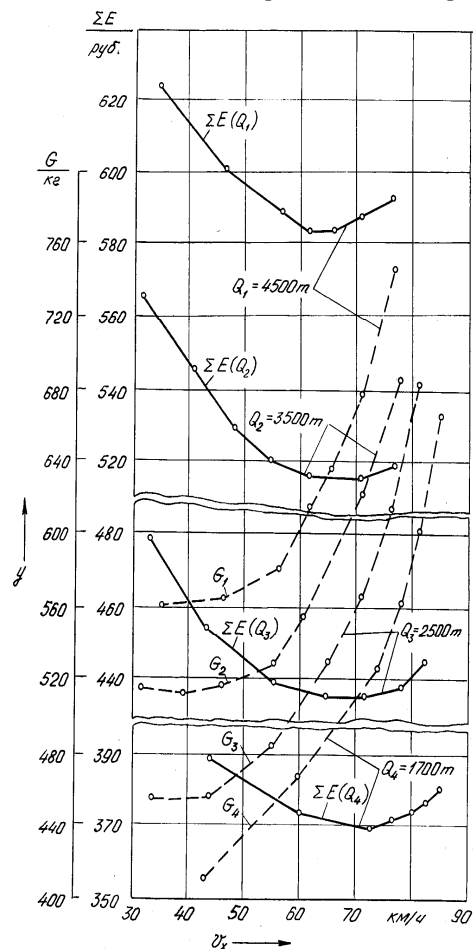


Рисунок 2 – Результаты расчета зависимости изменения расхода топлива G (кг) и суммарных эксплуатационных расходов ΣE , руб., от ходовой скорости движения v_x (эксперименты проводились в мае 1992 года)

Результаты расчета (см. рисунок 2) показали, что для любой массы поезда Q наименьший расход топлива получается при ходовой скорости движения поезда $v_x = 35 \dots 45$ км/ч, а наименьшие эксплуатационные расходы получились при ходовой скорости $v_x = 60 \dots 70$ км/ч, что соответствует временам хода, заложенным в нормативном графике движения поездов.

При выполнении с помощью ПЭВМ тяговых оптимизационных расчетов для построения зависимости не учитывался режим ослабления поля Re . Тяговые характеристики тепловоза 2ТЭ10М для каждой позиции контроллера Nk были аппроксимированы формулой $Fk = A_0 \cdot v^{A_1}$, а расходные характеристики тепловоза для каждой позиции контроллера представлены константой.

Список литературы

1 **Грунтов, П. С.** Эксплуатационная надежность станций / П. С. Грунтов. – М. : Транспорт, 1986. – 247 с.

Получено 10.07.2015

A. P. Keizer, I. A. Keizer, K. M. Shkuryn, A. G. Hinko. Economic evaluation of train schedule.

Train schedule in the current market environment is considered from the perspective of such performances as local speed, fuel consumption and operating costs. The results of evaluation of relations between fuel consumption and running speed, operating costs and running speed for different train masses are given. The flowchart of algorithm and the software are developed. Relation between fuel consumption and running speed is estimated using the Pontryagin Maximum Principle method with one function. The method of expenditure rates is used to evaluate relation between operating costs and running speed.

2 **Грунтов, П. С.** График движения и расход топливно-энергетических ресурсов / П. С. Грунтов, А. П. Кейзер // Железнодорожный транспорт. – 1995. – № 8. – С. 18–22.

3 **Грунтов, П. С.** Математические и технологические методы экономии топлива при тепловозной тяге / П. С. Грунтов, А. П. Кейзер // Всерос. ин-т науч. и технической информации (ВИНИТИ): транспорт, наука, техника, управление. – 1998. – № 9.

4 **Ерофеев, Е. В.** Исследование оптимальных программ автоматического ведения поезда при вариациях исходных параметров : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е. В. Ерофеев; Моск. ин-т инж. ж.-д. трансп. – М. : МИИТ, 1969.

5 **Кейзер, А. П.** Совершенствование режимов вождения поездов и повышение эксплуатационной надежности графика движения (в условиях тепловозной тяги) : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.08 / А. П. Кейзер; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 1995. – 227 с.

6 **Костромин, А. М.** Оптимизация управления локомотивом / А. М. Костромин. – М. : Транспорт, 1977. – 119 с.